第40卷 第5期
2023年5月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 5
May 2023

面向生态系统服务供需的开都-孔雀河流域生态安全格局研究

闫豫疆[1]， 李建贵[2]， 李均力[3]， 蒋 腾[4]

（1. 新疆农业大学经济管理学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2. 新疆农业大学林学与风景园林学院，新疆 乌鲁木齐 830052；3. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；4. 新疆林业科学院，新疆 乌鲁木齐 830018）

摘 要：构建干旱区生态安全格局有利于促进区域生态系统服务供应与需求之间的动态平衡。以干旱区开都-孔雀河流域为研究区，利用InVEST模型、RWEQ模型和Getis-Ord Gi*模型分析生态供给源地，以土地利用程度、地均GDP、人口密度和夜间灯光指数分析生态需求源地，并基于最小累积阻力模型确定供给源地与需求源地之间的生态廊道，从而构建研究区生态安全格局。研究结果表明：（1）开都-孔雀河流域生态供给源地14个，占研究区面积的21.46%，重点生态需求源地共9个斑块，占流域总面积4.63%；生态廊道126条，重要廊道17条，总长度654.68 km；生态节点65个，重点生态节点24个。（2）开都-孔雀河流域生态系统服务供给与需求空间错位明显，高供给区域与高需求区域呈现出以城镇边界为分界线的明显特征。（3）结合研究区自然地理特征和景观生态系统服务流动性，运用阻力面模型，构建"两核心、两片区、三横四纵多节点"的开都-孔雀河流域生态安全格局可为保障区域生态系统服务功能和可持续发展政策的制定提供科学参考。

关键词：生态系统服务供给与需求；生态廊道；生态安全网络；开都-孔雀河流域

生态系统是人类生存的基础条件，在社会经济快速发展和城市化进程不断推进的条件下，由生态系统服务供需失衡造成的生态安全问题日益突出。生态系统空间格局通过影响生态过程进而影响生态系统服务。为此，通过构建区域生态安全格局，优化生态网络，提高景观的连通性，实现对区域生态的有效调控和生态系统服务的供需均衡[1]。西北干旱内陆流域水资源缺乏且分布不均，生态安全脆弱，水土资源的过度开发加剧了生态安全风险，一定程度上限制了生态环境与经济社会的可持续发展。近年来，国家相继出台一系列的山水林田湖草沙冰生态保护修复工程，如孔雀河下游生态输水，就是为了恢复下游生态系统安全屏障。因此，从生态系统服务供需的角度构建流域生态系统安全格局，对提升和优化生态系统服务具有重要作用。

国外学者对生态安全格局的优化研究可追溯到20世纪初[2]，主要围绕生态网络、绿色基础设施等方面展开，其技术体系相对成熟[1]。国内学者俞孔坚[3]最早在1990年提出了景观生态安全格局概念，近年来相关学者逐步形成了"源地识别-阻力面构建-廊道提取-构建安全格局"的基本范式[4]。区域生态安全格局的构建方法有最小累积阻力模型、电路模型[5]和斑块重力模型，最小累积阻力模型应用最为广泛，其能较好地反映景观格局变化和生态过程演变的相互作用关系，源地识别主要从生境重要性[6]、生态敏感性[7]、景观连通性[8]等判定，而从生态系统服务供给和需求空间之间的联系考量较少[9]。从研究区域来看，国内大多学者多集中在经济发达、生态环境质量良好的区域，而对经济欠发达及生态环境脆弱的西北生态功能区的相关研究关注较少[9-10]，尤其是以干旱区独立流域为研究区域的较少。

收稿日期：2023-01-27； **修订日期**：2023-02-14
基金项目：中国科学院创新交叉团队（JCTD-2019-20）；国家自然科学基金（U203201，41671034）；第三次新疆综合科学考察项目（2021xjk-k1400）
作者简介：闫豫疆（1986-），男，博士研究生，主要从事区域生态与环境管理研究. E-mail: 330730542@qq.com
通讯作者：李建贵. E-mail: lijiangui1971@163.com

开都-孔雀河流域位于新疆塔里木盆地北缘，流域内有我国最大的内陆淡水湖博斯腾湖，湖泊生态系统安全与否对中下游生态及社会经济生活有重要影响[11-13]。流域以博斯腾湖为节点，上游的开都河流域水源充足、人类活动较少，生态系统处于较好的状态，而下游的孔雀河流域由于水土资源开发活动强烈，造成湿地萎缩、草地退化等生态安全问题。从全流域角度评估生态系统服务供需，构建和优化生态安全格局，可在有限水资源条件下实现对流域的整体性保护。因此，本文选择食物供给、生境质量、碳固持和防风固沙4项生态系统服务指标，采用热点分析法识别重要的生态供给源地，以人口密度、地均GDP、夜间灯光亮度和土地利用强度综合指标，为流域需求源地，利用最小累积阻力模型构建研究区生态安全格局，结合生态环境特征，提出开都-孔雀河流域生态安全格局的优化方案，为保障区域生态安全提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

开都-孔雀河流域位于新疆巴音郭楞蒙古自治州境内，地处塔里木盆地东北部、塔克拉玛干沙漠东北缘，流域包括和静、和硕、焉耆、博湖、库尔勒市、尉犁和若羌等地，总面积约9.35×10^4 km^2（图1）。流域水源补给主要来自于开都河上游高山地带的降水和冰雪融水，流经焉耆盆地、库尔勒和尉犁县，是绿洲农业生产、城市发展及居民生活的重要水源供给，“山水林田湖草沙冰”等生态要素构成一个典型的内陆干旱生态系统。流域属于温带大陆性干旱气候，日照时间长、降水量小、潜在蒸散量大，且流域上游西北方向地势高，下游东南方向地势低，气象差异明显，年降水量从上游的300~500 mm逐渐下降为下游的50~100 mm[14-16]。流域下游特别是孔雀河中下游地区的植被覆盖率较低，生态环境极为脆弱。

1.2 数据来源

开都-孔雀河流域2020年土地利用数据来源于地理空间数据云平台（http://www.gscloud.cn/）的GF-1 WFV多光谱数据，空间分辨率为16 m，对其进行辐射校正、几何校正、波段融合、图像镶嵌、裁剪、分类提取等处理。DEM数据来源于地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/），空间分辨率为30 m；夜间灯光数据来源于资源环境科学与数据中心（http://www.resdc.cn）的中国长时间序列逐年人造夜间灯光数据集（1984—2020）；植被归一化植被指数来源于数据共享服务系统（https://data.casearth.cn/）；植被净初级生产力来源于地理监测云平台（http://www.dsac.cn/）；碳排放数据来源于中国碳核算数据库（https://www.ceads.net.cn/）；国内生产总值（GDP）数据来源于资源环境科学与数据中心（http://www.resdc.cn/DOI）的中国GDP空间分布公里网格数据集；人口空间分布公里网格数据集和全国第七次人口

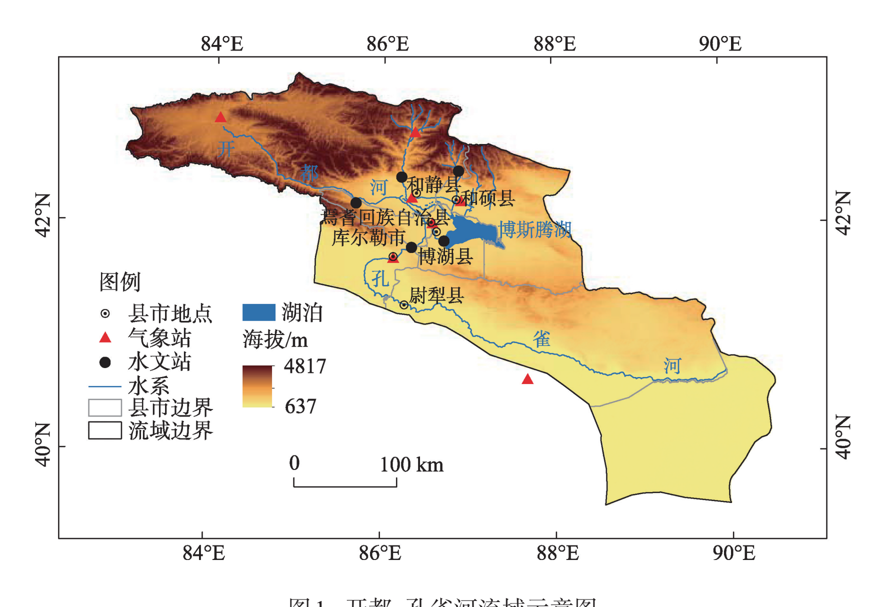


图1 开都-孔雀河流域示意图

Fig. 1 Sketch map of the Kaidu- Kongque River Basin

普查数据从WordPop（https://hub.worldpop.org/）和资源环境科学与数据中心获取，以及土壤数据来源于国家地球系统科学数据中心（http://www.geodata.cn）的中国土壤数据集（v1.1）（2009）；其他社会经济数据来源于新疆统计年鉴、巴音郭楞蒙古自治州和相关县市的统计年鉴。为保证数据的连续性和精准性，将数据坐标系统一为WGS-1984-UTM-zone-45，并将所有空间数据重采样为1 km×1 km分辨率的栅格图层。

1.3 研究方法

本文选取食物供给、碳固持、生境质量和防风固沙4项生态系统服务，从供给、需求两个层面对各项生态系统服务进行定量分析，借助ArcGIS中Spatial Statistics工具对研究区进行热点分析，从而确定生态供给源地和需求源地。运用最小累积阻力模型，建立生态阻力面，根据成本距离和路径分析，生成最小累积成本路径，并选择生态廊道之间交汇处的生态功能区作为生态节点。在此基础上，按照“识别生态源-构建阻力面-提取生态廊道”模式[17]，综合生态源地、廊道和节点等要素构建开都-孔雀河流域生态安全格局。

1.3.1 生态源地的识别　生态源地是指区域中生态系统服务供给/需求量较大或供给种类较多的斑块，具有一定空间扩展性和连续性景观组分[2]。本文针对研究区域生态本底状况，选择食物供给、碳固持、生境质量和防风固沙4项生态系统服务指标进行定量评估，选取单位面积生态系统服务供给/需求量大于流域平均值的斑块，作为生态系统服务的重要或重点区域，再通过热点分析，选择空间上连续、斑块面积大于50 km^{2}的区域，作为流域内生态系统服务供给/需求源地。

（1）生态系统服务供给量评估

食物供给服务的计算按区域归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）比值法，得到各栅格单元食物供给能力[1]；碳固持和生境质量服务采用当前应用较为广泛的InVEST 3.10.2模型，其中的碳固持模块（Carbon Storage and Sequestration）和生境质量模块（Habitat Quality）分别用于评估生态系统供给服务[10]；利用修正的土壤风蚀方程（Revised Wind Erosion Equation，RWEQ）估算研究区防风固沙服务供给量[11]。具体计算方法如表1所示。

表1 生态系统服务供给量计算方法

Tab. 1 Calculation of ecosystem service provisioning

生态系统服务	计算公式	变量解释
食物供给	$G_i = G_{sum} \times \frac{\mathrm{NDVI}_i}{\mathrm{NDVI}_{sum}}$	G_i 为 i 栅格分配的粮食、肉类、水果和水产品的产量（t）；G_{sum} 分别为研究区粮食总产量、肉类、水果和水产品总产量（t）；NDVI_i 为 i 栅格的归一化植被指数；NDVI_{sum} 为研究区NDVI值之和
碳固持	$C_{tot} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$	C_{tot} 为总碳储量；C_{above} 为地上碳储量；C_{below} 为地下碳储量；C_{soil} 为土壤碳储量；C_{dead} 为死亡有机物碳储量。单位均为t·hm^{-2}
生境质量	$D_{xj} = \sum_1^r \sum_1^y \left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^n w_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr}$ $Q_{xj} = H_{xj}\left[1 - \left(\frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2 + k^2} \right)\right]$	D_{xj} 为生境退化度，取值为0~1，其值越大代表生境退化程度越高；r 为威胁因子；y 为威胁因子 r 对应的栅格数量；w_r 为威胁因子的权重；r_y 为威胁因子的胁迫值；β_x 为生境受保护水平；S_{jr} 为生境 j 对威胁因子 r 的敏感性；i_{rxy} 为栅格 y 中的威胁因子 r 对栅格 x 的影响；Q_{xj} 为生境质量；H_{xj} 为生境适宜度；D_{xj} 为生境退化度；k 为半饱和参数，通常取生境退化度最大值的一半
防风固沙	$SR = SL_p - SL$ $SL_p = \frac{2Z}{Sp^2} \times Q_{p\max} \times e^{-(z/Sp^2)}$ $Q_{p\max} = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K')$ $S_p = 150.71 \times (WF \times EF \times SCF \times K')^{-0.3711}$ $SL = \frac{2Z}{sp^2} \times Q_{r\max} \times e^{-(z/Sr^2)}$ $Q_{r\max} = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C)$ $Sr = 150.71 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C)^{-0.3711}$	SR 为固沙量（kg·m^{-2}）；SL_p 为潜在风蚀量（kg·m^{-2}）；SL 为实际风力侵蚀量（kg·m^{-2}）；$Q_{p\max}$ 为潜在风力的最大输沙能力（kg·m^{-1}）；S_p 为潜在关键地块长度（m）；z 表示所计算下风向距离（m），本次计算取50 m；WF 为气候因子；EF 为土壤可蚀性百分比（%）；SCF 为土壤结皮因子（无量纲）；K' 为土壤糙度因子（无量纲）；$Q_{r\max}$ 为实际风力的最大输沙能力（kg·m^{-1}）；S_r 为实际关键地块长度（m）；C 为植被因子（无量纲）

（2）生态系统服务需求量评估

生态系统服务需求是指在一定时空范围内被人类实际利用的自然资源和服务，需求量的大小反映人类社会对自然生态环境的作用强度，以及对生态系统服务的需求程度[4]。本文选取人口密度、地均GDP、夜间灯光指数和土地利用强度4项指标反映研究区生态系统服务的需求程度。由于人口、GDP和夜间灯光指数的单位不统一，在空间分布上存在显著差异，本文首先采用离差标准化方法计算各生态系统服务需求量，再利用自然对数法计算总体生态系统服务需求量，进而消除由单位和数据量的差异造成的局部剧烈波动[12]。计算公式如下：

$$x=\frac{x_i-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} \quad (1)$$

$$Y_i=x_1+\lg x_2+\lg x_3+\lg x_4 \quad (2)$$

式中：x为标准化后的生态系统服务需求量；x_i为第i个单元的生态系统服务需求量；$x_{\max}$为流域最大值，$x_{\min}$为流域最小值；Y_i表示研究单元i对生态系统服务的总需求；x_1、x_2、x_3和x_4分别表示土地利用强度、人口密度（人·km^{-2}）、地均GDP（万元·km^{-2}）和平均夜间灯光指数（Average Nighttime Light Index，ANLI）。

（3）热点分析

利用ArcGIS软件的热点分析工具，识别研究区生态系统服务在空间中的高值区（热点区域）与低值区（冷点区域）的集聚程度，得到具有显著统计学意义的正的G_i^*（或Z）数值，Z值得分越高，高值（热点）的空间聚类就越明显[18]。将热点分析运用到生态系统服务研究中，其输出结果呈现表面连续性，表征景观的连通性，便于区域生态系统更好的管理[19]。其计算公式如下：

$$G_i^*=\frac{\sum_{j=1}^{n}w_{ij}x_j-\bar{x}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}}{S\sqrt{\frac{\left[n\sum_{j=1}^{n}w_{ij}^2-\left(\sum_{j=1}^{n}w_{ij}\right)\right]}{n-1}}} \quad (3)$$

式中：w_{ij}为格网i与格网j之间的空间权重矩阵；x_j为格网j的属性值；n为总格网数。其中：

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \quad (4)$$

$$S=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})} \quad (5)$$

在我国西北干旱地区，水资源作为非常重要的约束因子，很大程度上决定了生态环境和土地覆被类型，因此，本文将该地区的湖泊和湿地作为供给源地[20]。

1.3.2 生态阻力面构建 累积阻力模型主要描述"源地"生态系统服务流运行的空间态势[8]，开都-孔雀河流域地貌复杂，从上游到下游分别为山间盆地、高山峡谷、焉耆盆地和塔里木沉降盆地，地形差异较大以及土地覆被类型的变化都是生态源地向外扩散的阻力来源[21-22]。干旱区绿洲生态系统受自然和人为因素的影响都比较大，选择景观类型、高程、坡度和地均GDP作为阻力因子[23-25]，其阻力分量及其系数设置见表2所示。生态源地与目标单元之间的最小累积阻力计算公式如下：

$$\mathrm{MCR}=f_{\min}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}D_{ij}\times R_i \quad (6)$$

式中：MCR为最小累积阻力；D_{ij}为物质流从源地j到源地i的欧氏距离；R_i为空间某一景观单元i的阻力值；Σ表示源地i与源地j之间穿越所有单元阻力的累积；$f_{\min}$为景观单元对不同的源取累积阻力最小值；m和n分别为供给源地和需求源地总数。

1.3.3 生态廊道和生态节点识别

（1）生态廊道识别

生态廊道是发挥景观生态系统服务的重要途径，其连通性是衡量廊道结构的关键指标[26-27]。根据上述计算的生态阻力面，利用GIS中的Distance分析工具，以生态供给源地为中心，基于路径成本分析工具生成成本回溯链和距离，进而得到生态供给源地到需求源地的最小阻力路径，即生态廊道。本文考虑到干旱区水资源的重要性，将河流、水系作为流域的关键廊道[28-29]。

（2）重力模型

重力模型用于定量计算源与目标间相互作用力大小，利用力越大，则代表廊道越重要，计算公式如下：

$$G_{ij}=\frac{N_iN_j}{D_{ij}^2}=\frac{\left(\frac{\ln(S_i)}{P_i}\right)\times\left(\frac{\ln(S_j)}{P_j}\right)}{\left(\frac{L_{ij}}{L_{\max}}\right)^2}=\frac{L_{\max}^2\ln(S_i)\ln(S_j)}{L_{ij}^2P_iP_j} \quad (7)$$

表2　景观累计阻力分量及其阻力系数设置

Tab. 2　Cumulative resistance components of the landscape and their resistance factor settings

阻力面分量	权重	阻力值				
		10	30	50	70	100
景观类型	0.30	水域、湿地、林地	草地	耕地	未利用地	建设用地
高程/m	0.15	600~1200	1200~2000	2000~2800	2800~3400	3400~4900
坡度/(°)	0.25	0~6	6~12	12~22	22~33	33~80
地均GDP/(元·km^{-2})	0.30	0~727	727~2373	2373~4632	4632~6852	6852~9761

式中:G_{ij}是供给源地i和需求源地j的相互作用,其大小反映供给和需求源地之间潜在生态廊道的重要程度;N_i和N_j是i和j两个斑块的权重值;D_{ij}是i和j两个斑块之间潜在廊道阻力的标准化值;P_i为斑块i阻力值;P_j为斑块j阻力值;S_i是斑块i的面积;S_j是斑块j的面积;L_{ij}是i和j两个斑块之间的廊道阻力值;L_{max}是所有廊道累计阻力的最大值。

(3) 生态节点识别

生态节点是区域生态体系或景观格局中重要的区域,对区域生态安全起着控制点的作用。本文采用生态廊道的交点作为生态节点,将关键廊道与潜在廊道间的交点作为一级生态节点,潜在廊道间的交点作为二级生态节点[29]。

2　结果与分析

2.1　生态系统服务供给源地空间格局

通过对2020年开都–孔雀河流域食物供给、碳固持、生境质量和防风固沙生态服务供给量进行评估(图2),食物供给高的区域主要分布在中游耕地较为密集的区域,其次是开都河上游的草原;碳固持服务与食物供给服务类似,且植被覆盖度越高,碳固持服务能力越强;生境质量服务供给指数较高的区域主要为大面积草地或水域,主要分布在开都河上游草原区与博斯腾湖湖区,而建设用地、耕地外围的生境质量较差;防风固沙服务供给高值区主要分布于地形起伏较大的丘陵山区,结合气象因

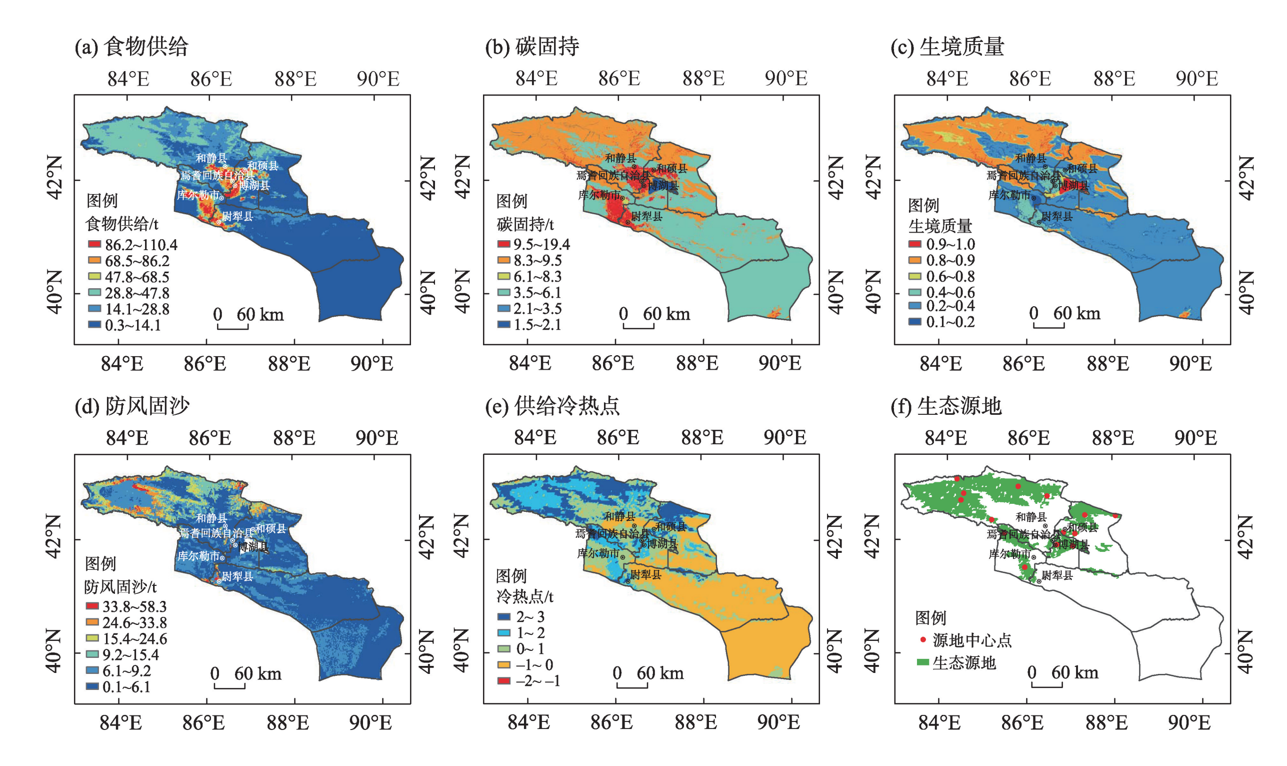


图2　开都–孔雀河流域生态系统供给服务空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of ecosystem supply services in Kaidu- Kongque River Basin

子、土壤质地和植被覆盖度综合分析可知，开都河上游山区降雨丰富，植被覆盖度高，防风固沙量功能较高，但也存在部分草场退化、沙化等功能退化的现象。

从研究区生态系统供给服务的冷热点分布可知(图2e)，热点区同样分布于开都河上游草原区及中部耕作区。去除面积小于50 km²的斑块，最终确定开都-孔雀河流域生态供给源地14个，总面积为20068.4 km²，占研究区面积的21.5%(图2f)。

2.2 流域生态系统服务需求源地空间特征

开都-孔雀河流域人口分布、夜间灯光指数、地均GDP和土地利用强度空间分异显著(图3)，前三者的高值区域主要分布在各县市城区以及各县政府驻地所在乡镇，这些地区整体生态压力较高，对生态系统服务需求较大，综合各项需求指标，去除面积较小的斑块，得到全流域生态需求的空间格局(图3e)。识别生态需求源地斑块共9个，合计面积为4327.5 km²，占流域总面积4.6%。总体而言，流域生态系统服务需求集中分布于中游区域，高值聚集区为焉耆盆地和库尔勒市-尉犁县。生态系统服务低需求区域主要分布在流域的上游山区和下游荒漠区，该区域地理位置较为偏僻，人类活动干扰较小，故而对生态系统服务需求相对较小。

2.3 生态廊道和生态节点构建

2.3.1 阻力面构建　生态系统能量流动和物质循环遇到的阻力值越小，物质和能量在景观单元之间的流动就越容易，所需提供的生态系统服务就越多[1]。流域生态阻力低值区主要分布于上游巴音布鲁克国家级自然保护区、中游博斯腾湖大小湖区、焉耆盆地绿洲农业区和库尔勒-尉犁农业区；高值区主要分布在植被覆盖少的山区以及受人类影响大的城镇地区(图4)。

2.3.2 生态廊道识别　利用最小阻力模型计算研究区生态系统服务供给源地与需求源地之间的最小成本路径，共得到生态廊道126条，然后利用重力模型计算出各生态廊道的重力矩阵(表3)，相互作用力强度大于1作为重要廊道，共计17条，总长度654.7 km。生态廊道在开都河流域有两条轴线，一是从西北向东南延伸的轴线，二是从北部山区向南延伸的轴线，在焉耆盆地较为错综复杂；孔雀河流域生态廊道相对集中，分布在库尔勒-尉犁县区域。

2.3.3 生态节点识别　生态节点实际上是处于生态廊道沿线的特定位置，相对生态源地面积较小的生态斑块[23]，通过生态节点提取，开都-孔雀河流域有生态节点65个，其中，重点生态节点24个，如图5所示。

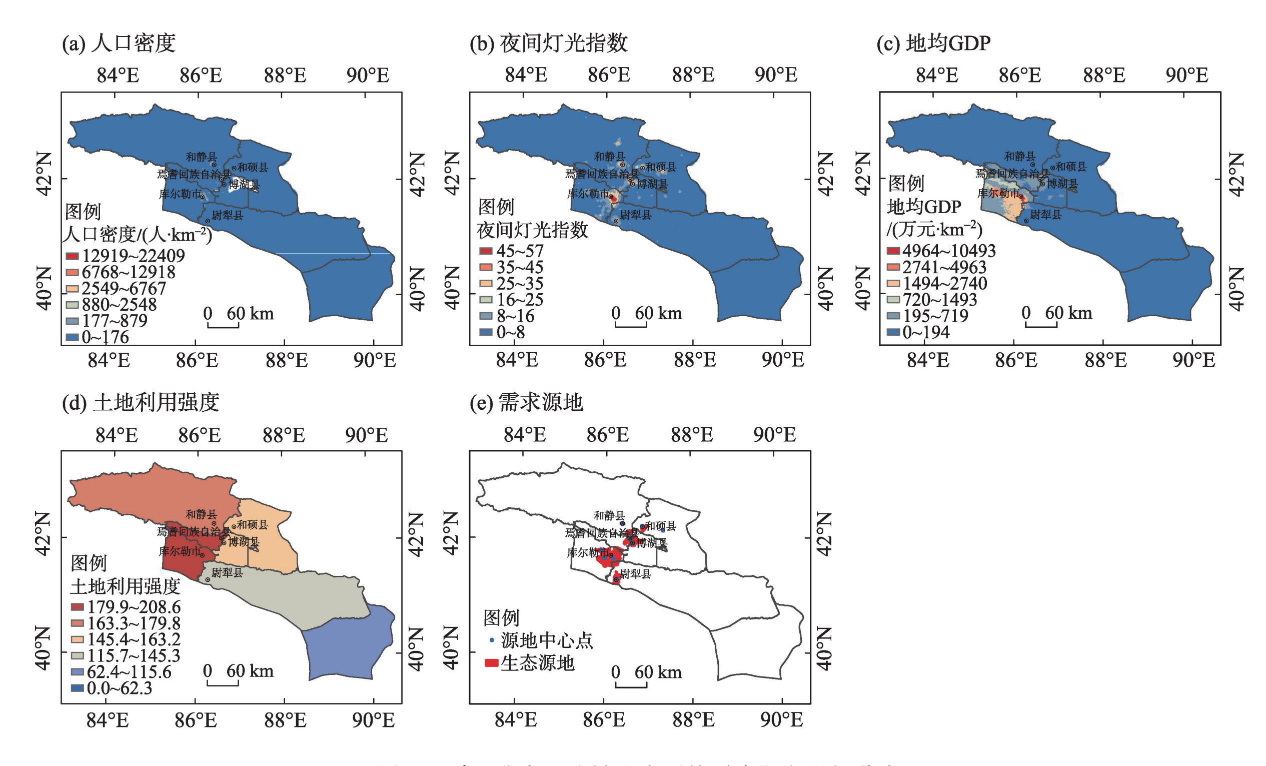


图3　开都-孔雀河流域生态系统需求服务空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of ecosystem demand services in Kaidu-Kongque River Basin

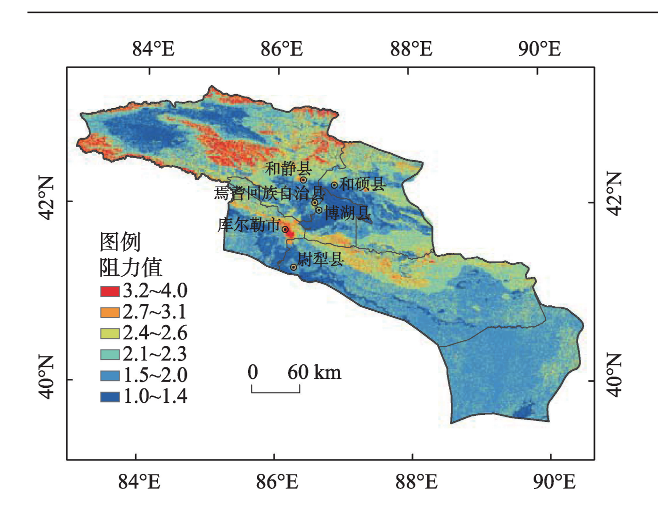


图4 开都-孔雀河流域生态扩张累计阻力面

Fig. 4 Cumulative resistance surface of ecological expansion in the Kaidu-Kongque River Basin

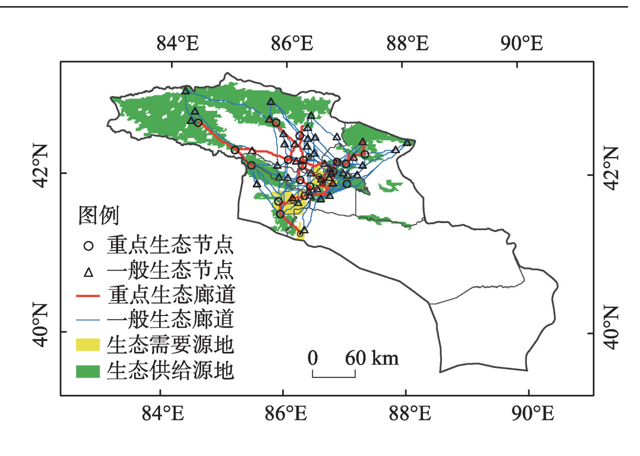


图5 开都-孔雀河流域生态廊道和生态节点分布

Fig. 5 Distribution of ecological corridors and ecological nodes in the Kaidu-Kongque River Basin

2.4 生态安全格局构建

开都-孔雀河流域具有完整的“山水林田湖草沙冰”生态系统结构,且空间分布差异较明显。在原有生态廊道结构的基础上,结合水资源分布以自然和人工廊道构建起的研究区生态安全格局,以生态功能区划为基础背景,综合考虑生态基底、自然保护区位置及各生态安全要素分布,构建了“两核心、两片区、三横四纵多节点”的流域生态安全格局(图6)。

(1) 两核心、两片区是核心生态保育区和重点农业发展区,其中,两个核心生态保育区是巴音布鲁克国家级自然保护区、巩乃斯国家森林公园和博斯腾湖国家湿地公园,这些区域保障着整个流域的水资源,丰富景观类型,提高生态系统完整性,其生态保护修复策略主要是增加生态廊道,扩大自然或半自然生态绿地比例,增强生境间的连通度。重点农业发展区包括焉耆盆地农业发展区和库尔勒市-尉犁县农业发展区,该区域一方面应注重农业产业结构调整以提高生态效益和提升生态系统服务;二是应充分利用闲置土地,深度挖掘农村建设用地潜力,提升闲置土地的综合效益。

(2) 三横四纵多节点,三横为开都河流域生态保护与修复发展廊道和北侧重水源涵养与生物多样性保护修复廊道,以及铁门关至库尔勒市农业发展廊道;四纵为尤尔都斯盆地生物多样性保护区重

表3 生态廊道重力值统计

Tab. 3 Statistical of gravity values for ecological corridors

供给源点	需求源点								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.9	0.3	0.5	0.1	0.1	1.0	3.3	0.3	0.8
2	3.1	2.2	2.1	2.4	15.8	0.1	0.1	0.1	0.2
3	0.5	0.2	1.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
4	2.0	0.4	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1
5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	2.4	4.2	9.6	0.4	0.5	0.1	0.1	0.0	0.1
7	4.6	18.1	2.1	0.6	0.6	0.1	0.1	0.0	0.1
8	1.6	0.3	0.4	0.1	0.1	0.2	0.2	0.0	0.1
9	0.8	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1
10	1.5	1.3	6.0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1
11	0.4	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.9	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
14	0.2	0.2	0.4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

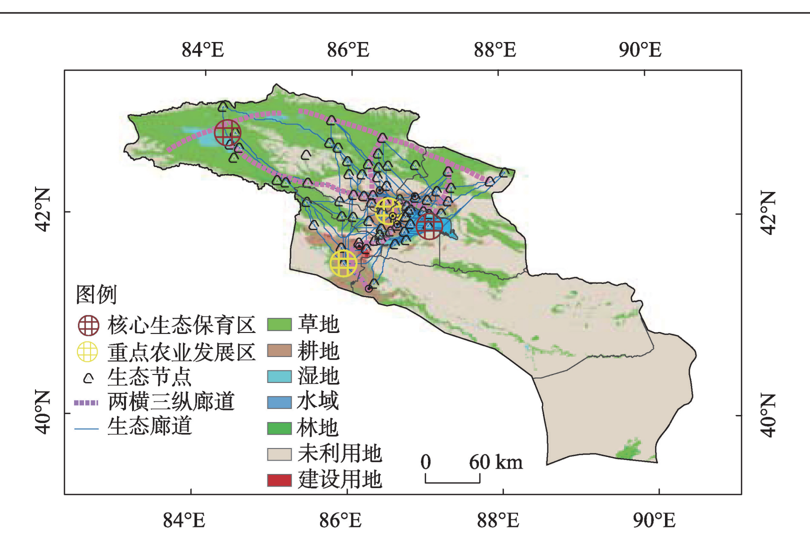


图6 开都-孔雀河流域“源地-廊道-节点”生态网络格局

Fig. 6 Source-corridor-node ecological network pattern in the Kaidu-Kongque River Basin

点生态廊道、黄水沟重点生态廊道、孔雀河重点生态廊道以及北部源地间流通缓冲廊道;“多节点”位于生态系统服务需求和供给交汇处,以及生态廊道分布密集的焉耆盆地、库尔勒市。在构建“绿色斑块、生态廊道、湿地、农田”镶嵌的绿地生态网络系统,突出绿地网络的社会-生态复合功能,利用人工和自然生态系统,促进实施山水路林村综合治理,进而实现生态系统的良性循环,改善区域内生物栖息地环境。

3 讨 论

开都-孔雀河流域是“山水林田湖草沙冰”一体化保护与系统治理的典型区域,研究该区域的生态系统服务的供需及生态状况对维护流域生态安全、促进流域经济社会可持续发展都具有重要意义。本文从生态系统服务供给和需求入手,识别流域生态系统供给和需求空间,依托生态源地、廊道和节点构建了流域生态安全格局,选择了供给/需求量大于50%的区域作为生态服务源地的重要区域,从各项服务的空间分布来看,其结果满足精度要求,但未考虑不同生态系统服务对不同区域的重要程度,忽略了区域生态系统服务的主体功能。

与以往的生态安全格局构建研究相比[18,29],本文更注重以整个流域为研究对象,生态系统服务的供给和需求在相对独立的空间内形成闭环,更有利于供需关系的研究。开都-孔雀河流域中下游区域经济发展和人口数量较为聚集,存在高供给高需求和低供给高需求的状态,生活和生产空间重合,人工干预对生态系统服务的流通影响较大。基于此,本文构建了“两核、两片区、三横四纵多节点”多要素的生态安全网络结构,并提出相应的保护和优化生态系统的策略,其难点在于打通网络的连通性。开都-孔雀河流域道路、人工建筑、围栏等人工要素往往是生态廊道的主要阻断物,而由于缺少相应的数据未将其纳入生态网络结构体系建设,虽然研究结果具有一定的可操作性,但缺乏对小尺度的详细探讨,今后有待更深一步的研究。

4 结 论

以干旱区开都-孔雀河流域为研究区,综合运用InVEST模型、RWEQ模型、Getis-Ord Gi^*和最小阻力模型等方法,识别源地、廊道和生态节点,构建了流域的生态安全格局。主要得出如下结论:

(1) 开都-孔雀河流域生态系统服务供给与需求空间错位明显,供给热点区较集中在流域的上游区域,需求热点区较集中在流域的中游,并呈现出以城镇边界为分界线的明显分异特征。

(2) 开都-孔雀河流域生态供给源地14个,总面积为20068.4 km^2,占研究区面积的21.5%,其中重点生态需求区共9个斑块,合计面积为4327.5 km^2;生态廊道126条,其中重要廊道共17条,总长度654.7 km;生态节点65个,包含重点生态节点24个。

(3) 结合流域自然地理特征和生态系统服务供给和需求分布特点,运用最小阻力模型,构建了“两

核心、两片区、三横四纵多节点”的开都-孔雀河流域生态安全格局,并针对不同区域特点提出了保护和优化生态系统的策略。

参考文献(References):

[1] 杨凯, 曹银贵, 冯喆, 等. 基于最小累积阻力模型的生态安全格局构建研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(5): 555-565. [Yang Kai, Cao Yingui, Feng Zhe, et al. Research progress of ecological security pattern construction based on minimum cumulative resistance model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(5): 555-565.]

[2] 杨亮洁, 王晶, 魏伟, 等. 干旱内陆河流域生态安全格局的构建及优化——以石羊河流域为例[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 5915-5927. [Yang Liangjie, Wang Jing, Wei Wei, et al. Ecological security pattern construction and optimization in Arid Inland River Basin: A case study of Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 5915-5927.]

[3] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15. [Yu Kongjian. Landscape ecological safety patterns for biological conservation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 8-15.]

[4] 易丹, 肖善才, 韩逸, 等. 生态系统服务供给和需求研究评述及框架体系构建[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3942-3952. [Yi Dan, Xiao Shancai, Han Yi, et al. Review on supply and demand of ecosystem service and systematic framework construction[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3942-3952.]

[5] 周浪, 李明慧, 周启刚, 等. 基于电路理论的特大山地城市生态安全格局构建以重庆市都市区为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 319-325, 334. [Zhou Lang, Li Minghui, Zhou Qigang, et al. Construction of ecological security patterns in mega-mountain cities based on circuit theory: Taking Chongqing metropolitan area as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(2): 319-325, 334.]

[6] 吴金华, 刘思雨, 白帅. 基于景观生态安全的神木市生态廊道识别与优化[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1120-1127. [Wu Jinhua, Liu Siyu, Bai Shuai. Identification and optimization of ecological corridor in Shenmu City based on landscape ecological security[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1120-1127.]

[7] 赵宇豪, 罗宇航, 易腾云, 等. 基于生态系统服务供需匹配的深圳市生态安全格局构建[J]. 应用生态学报, 2022, 33(9): 2475-2484. [Zhao Yuhao, Luo Yuhang, Yi Tengyun, et al. Constructing an ecological security pattern in Shenzhen, China, by matching the supply and demand of ecosystem services[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(9): 2475-2484.]

[8] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 基于"重要性-敏感性-连通性"框架的云浮市生态安全格局构建[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484. [Chen Xin, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Constructing ecological security patterns in Yunfu City based on the framework of importance-sensitivity-connectivity[J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 471-484.]

[9] 张豆, 渠丽萍, 张桀滈. 基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化——以长三角地区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7525-7537. [Zhang Dou, Qu Liping, Zhang Jiehao. Ecological security pattern construction method based on the perspective of ecological supply and demand: A case study of Yangtze River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7525-7537.]

[10] 刘春芳, 王韦婷, 刘立程, 等. 西北地区县域生态系统服务的供需匹配——以甘肃古浪县为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(9): 2177-2190. [Liu Chunfang, Wang Weiting, Liu Licheng, et al. Supply-demand matching of county ecosystem services in Northwest China: A case study of Gulang County[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(9): 2177-2190.]

[11] 徐洁, 肖玉, 谢高地, 等. 防风固沙型重点生态功能区防风固沙服务的评估与受益区识别[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5857-5873. [Xu Jie, Xiao Yu, Xie Gaodi, et al. Assessment of wind erosion prevention service and its beneficiary areas identification of national key ecological function zone of windbreak and sand fixation type in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 5857-5873.]

[12] 岳文泽, 侯丽, 夏皓轩, 等. 基于生态系统服务供需平衡的宁夏固原生态修复分区与优化策略[J]. 应用生态学报, 2022, 33(1): 149-158. [Yue Wenze, Hou Li, Xia Haoxuan, et al. Territorially ecological restoration zoning and optimization strategy in Guyuan City of Ningxia, China: Based on the balance of ecosystem service supply and demand[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(1): 149-158.]

[13] 王文辉, 黄粤, 刘铁, 等. 开都-孔雀河流域水资源优化配置[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1030-1039. [Wang Wenhui, Huang Yue, Liu Tie, et al. Optimized redistribution of water resources in the Kaidu-Kongque River Basin[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1030-1039.]

[14] 李玉焦, 陈亚宁, 张齐飞, 等. 1960—2018年博斯腾湖水位变化特征及其影响因素分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 48-58. [Li Yujiao, Chen Yaning, Zhang Qifei, et al. Analysis of the change in water level and its influencing factors on Bosten Lake from 1960 to 2018[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 48-58.]

[15] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 论中国干旱区湖泊研究的重要意义[J]. 干旱区研究, 2007, 24(2): 137-140. [Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun, et al. On the importance of research on the lakes in arid land of China[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(2): 137-140.]

[16] 陈亚宁, 杜强, 陈跃滨. 博斯腾湖流域水资源可持续利用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013. [Chen Yaning, Du Qiang, Chen Yuebin. Study on the Sustainable use of Water Resources in the Bosten Lake Basin[M]. Beijing: Science Press, 2013.]

[17] 荣月静, 严岩, 王辰星, 等. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7197-7206.

[Rong Yuejing, Yan Yan, Wang Chenxing, et al. Construction and optimization of ecological network in Xiong' an New Area based on the supply and demand of ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7197-7206.]

[18] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 基于InVEST模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析[J]. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2783-2792. [Wang Bei, Zhao Jun, Hu Xiufang. Spatial pattern analysis of ecosystem services based on InVEST in Heihe River Basin[J]. Chinese Journal of Ecology 2016, 35(10): 2783-2792.]

[19] 和娟, 师学义, 付扬军. 基于生态系统服务的汾河源头区域生态安全格局优化[J]. 自然资源学报, 2020, 35(4): 814-825. [He Juan, Shi Xueyi, Fu Yangjun. Optimization of ecological security pattern in the source area of Fenhe River Basin based on ecosystem services[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(4): 814-825.]

[20] 位宏, 徐丽萍, 李晓蕾. 基于最小累计阻力面模型的博斯腾湖流域景观格局的分析与优化[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2018, 36(2): 169-175. [Wei Hong, Xu Liping, Li Xiaolei. Analysis and optimization of landscape pattern in Boston Lake Basin based on minimum cumulative resistance[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2018, 36(2): 169-175.]

[21] 王雅, 蒙吉军. 黑河中游土地利用变化对生态系统服务的影响[J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 200-207. [Wang Ya, Meng Jijun. Impact of land use change on ecosystem services in the middle-reaches of Heihe River[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 200-207.]

[22] 胡其玉, 陈松林. 基于生态系统服务供需的厦漳泉地区生态网络空间优化[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 342-355. [Hu Qiyu, Chen Songlin. Optimizing the ecological networks based on the supply and demand of ecosystem services in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2): 342-355.]

[23] 刘立程, 刘春芳, 王川, 等. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1921-1937. [Liu Licheng, Liu Chunfang, Wang Chuan, et al. Supply and demand matching of ecosystem services in loess hilly region: A case study of Lanzhou[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1921-1937.]

[24] 岑晓腾. 土地利用景观格局与生态系统服务价值的关联分析及优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. [Cen Xiaoteng. Correlation Analysis and Optimization between Land use Landscape Pattern and Ecosystem Service Value: A Case Study of South Coast of Hangzhou Bay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.]

[25] 刘维, 周忠学, 郎睿婷. 城市绿色基础设施生态系统服务供需关系及空间优化——以西安市为例[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1500-1513. [Liu Wei, Zhou Zhongxue, Lang Ruiting. Supply-demand relations of ecosystem services of urban green infrastructure and its spatial optimization: A case study of Xi' an[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1500-1513.]

[26] 易浪, 孙颖, 尹少华, 等. 生态安全格局构建: 概念、框架与展望[J]. 生态环境学报, 2022, 31(4): 845-856. [Yi Lang, Sun Ying, Yin Shaohua, et al. Construction of ecological security pattern: Concept, framework and prospect[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(4): 845-856.]

[27] 王正伟, 王宏卫, 杨胜天, 等. 基于生态系统服务功能的新疆绿洲生态安全格局识别及优化策略——以拜城县为例[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 91-104. [Wang Zhengwei, Wang Hongwei, Yang Shengtian, et al. Identification of optimization strategies of ecological security patterns of Oasis in Xinjiang based on ecosystem service function: Taking Baicheng County as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 91-104.]

[28] 李凯, 侯鹰, Hans Skov-Petersen, 等. 景观规划导向的绿色基础设施研究进展——基于"格局-过程-服务-可持续性"研究范式[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 435-448. [Li Kai, Hou Ying, Hans Skov-Petersen, et al. Research progress of green infrastructure oriented by landscape planning: From the perspective of "pattern- process- services- sustainability" research paradigm[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2): 435-448.]

[29] 周璟, 王宏卫, 谈波, 等. 开都河流域生态安全格局构建与生态修复分区识别[J]. 生态学报, 2022, 42(24): 10127-10137. [Zhou Jing, Wang Hongwei, Tan Bo, et al. Construction of ecological security pattern and identification of ecological restoration zones in the Kaidu River Basin[J] Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10127-10137.]

Construction of ecological security patterns in the Kaidu-Kongque River Basin based on the supply and demand of ecosystem services

YAN Yujiang[1], LI Jiangui[2], LI Junli[3], Jiang Teng[4]

(1. College of Economics and Management, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 3. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 4. Xinjiang Academy of Forestry Sciences, Urumqi 830018, Xinjiang, China)

Abstract: The construction of an ecological security pattern in arid zones is conducive to promoting a dynamic balance between the supply and demand of regional ecosystem services. This study involves the Kaidu-Kongque River Basin in an arid zone and uses the InVEST model, the RWEQ model, and the Getis-Ord Gi* model to analyze the ecological supply sources, degree of land use, GDP per km^2, population density, and the nighttime light index. This approach was used to analyze the ecological demand sources and determine the ecological corridors between supply and demand sources based on the minimum cumulative resistance model so as to construct an ecological security pattern of the study area. The results of the study are as follows: (1) There are 14 ecological supply source areas in the Kaidu-Kongque River Basin, accounting for 21.46% of the study area, and a total of 9 patches of key ecological demand source areas, accounting for 4.63% of the total area of the basin; 126 ecological corridors, including a total of 17 important corridors with a total length of 654.68 km; 65 ecological nodes, including 24 key ecological nodes. (2) The spatial mismatch between supply and demand of ecosystem services in Kaidu-Kongque River Basin is obvious, and the high supply area and high demand area show obvious characteristics with urban boundary as the dividing line. (3) Combining the natural geographic characteristics and the mobility of landscape ecosystem services in the study area, the resistance surface model is used to construct "two cores, two zones, three horizons, four verticals, and multiple nodes" of the Kaidu-Kongque River Basin. In conclusion, the ecological security pattern of the Kaidu-Kongque River Basin can provide a scientific reference for protecting regional ecosystem service functions and formulating sustainable development policies.

Keywords: ecosystem service supply and demand; ecological corridor; ecological safety network; Kaidu-Kongque River Basin